核能综合利用研究现状与展望

王建强* 戴志敏 徐洪杰
中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800

摘要 核能是满足能源供应、保证国家安全的重要支柱之一。核能发电在技术成熟性、经济性、可持续性等方面具有很大的优势，同时相较于水电、光电、风电具有无间歇性、受自然条件约束少等优点，是可以大规模替代化石能源的清洁能源。目前核能主要用于发电，只有少数反应堆应用于核能供热和海水淡化。随着技术的发展，尤其是第四代核能系统技术逐渐成熟和应用，核能有望超脱出仅仅提供电力的角色。文章围绕核能的综合利用，从高效发电、核能制氢、海水淡化、核能供热和高温工艺热利用的角度，分别阐述了核能综合利用现状以及未来发展趋势，最后展望了核能在未来构建多能融合的复合能源系统中的重要作用。

关键词 核能，第四代核反应堆，综合利用，核能制氢，核能供热

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.04.011

1 核能利用国内外现状及优势

1.1 国内外现状

核能是满足能源供应、保证国家安全的重要支柱之一。全球发电总量中，核能发电比例为 10.4%，截至 2019 年 3 月，全球有 449 座商用核动力反应堆在 30 个国家运行，总装机容量达 396 GW，在建核电机组 55 座，在建核电机组装机容量 57 GW[1,2]。此外，还有大约 240 座研究堆运行在 56 个国家，180 座动力堆为大约 140 艘舰船、潜艇提供着动力①。

核能发电在技术成熟性、经济性、可持续性等方面具有很大的优势，同时相较于水电、光电、风电，具有无间歇性、受自然条件约束少等优点，是可以大规模替代化石能源的清洁能源。根据中国核能行业协会统计，截至 2018 年 12 月31日，我国投入商业运行的核电机组 44 台（不含我国台湾地区），总装机容量 44.6 GW，在建的核电机组 11 台，总装机容量 11 GW。2018 年 1—12 月，我国核电机组累计发电量为 2 865.11 亿千瓦时，占总发电量的 4.22%。核电设备平均利用小时数为 7 499.22 小时，设备平均利用率为 85.61%[3]。与燃煤发电相比，核能发电相

*通讯作者
资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（XDA21000000）
修改稿收到日期：2019年4月7日

① https://en.wikipedia.org/wiki/Research_reactor; https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_power#cite_ref-256.

当于减少燃烧标准煤 7 646.8 万吨，减少排放二氧化碳 20 034.6 万吨，减少排放二氧化硫 65.0 万吨，减少排放氮氧化物 56.6 万吨。

在确保安全的基础上高效发展核电，是当前我国能源建设的一项重要政策，对保障能源供应与安全、保护环境、实现可持续发展具有十分重要的意义。国家发展改革委、国家能源局在《能源发展“十三五”规划》中明确了“十三五”时期我国能源发展的路径和重点任务，提出努力构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系。国家发展改革委、国家能源局《能源技术革命创新行动计划（2016—2030 年）》也明确提出我国将继续深入实施创新驱动发展战略，完善核能领域科技研发体系，支持小型模块化堆、第四代核能系统、核能制氢等领域的科研工作，使核能为建设“美丽中国”贡献更多力量。

1.2 优势

从能源效率的观点来看，直接使用热能是更为理想的一种方式，发电只是核能利用的一种形式。随着技术的发展，尤其是第四代核能系统技术的逐渐成熟和应用，核能有望超脱出仅仅提供电力的角色，通过非电应用如核能制氢、高温工艺热、核能供暖、海水淡化等各种综合利用形式，在确保全球能源和水安全的可持续性发展方面发挥巨大的作用[4]。

核能制氢与化石能源制氢相比具有许多优势，除了降低碳排放之外，由于第四代核反应堆可以提供更高的输出温度，生产氢气的电能消耗也更少。目前，约 20% 的能源消耗用于工艺热应用，高温工艺热在冶金、稠油热采、煤液化等应用市场的开发将很大程度上影响核能发展。用核热取代化石燃料供暖，在保证能源安全、减少碳排放、价格稳定性等方面具有巨大的优势，也是一个重要的选项。目前，全球饮用水需求日益增长，而核能用于海水淡化已被证明是满足该需求的一个可行选择，这为缺少淡水的地区提供了希望。核能海水淡化还可用于核电厂的有效水管理，提供运行和维护所有阶段的定期供水。

2 第四代先进核能系统

2.1 第四代先进核能系统的特点及国际研究现状

未来核能的发展趋势之一是小型模块化反应堆（SMR），其电功率通常为数十兆瓦到百兆瓦，建设周期短、布置灵活、适应性强、选址成本低。此外，SMR 还可以节约资金成本，并降低环境和金融风险。

第四代先进核能系统主要包括高温气冷堆、钠冷快堆、熔盐堆、超临界水堆和铅冷快堆，而颠覆传统设计的小型模块化第四代核反应堆，因其具备固有安全性高、核燃料可循环、物理防止核扩散和更优越的经济性等特点，成为核能研发和投资的热点。例如，美国和加拿大近年陆续成立了十几家新型核能公司，包括加拿大地球能源（Terrestrial Energy）、美国泰拉能源（TerraPower）等，并已经开始与电力公司和国立研究机构合作，推进小型模块化第四代核反应堆的示范应用。

第四代核能系统主要特征是经济性高、安全性好、废物产生量小，并能防止核扩散[5]。而核能制氢、高温工艺热利用、核能供暖、海水淡化等非电应用则是第四代核能系统的主要应用目标（图 1）。

作为下一代先进核能系统，针对第四代核能技术的发展，第一届“第四代核能系统国际论坛（Generation IV International Forum，GIF）”于 2002 年提出了第四代核电的 6 种堆型和研究开发路线图。2012 年 11 月在圣地亚哥、2015 年 5 月在日本分别举办了第二、三届研讨会。第四届 GIF 研讨会于 2018 年 10 月 16—17 日在法国巴黎举行，议题包括第四代核能系统发展的驱动因素、第四代核能系统演示和部署的创新和研发支持、从研究到项目示范、从示范到市场化 4 个方面。GIF 也与国际原子能机构（IAEA）保持着长期的合作关系。第 11 届 GIF-IAEA 创新型反应堆项目（INPRO）对接会议于 2017 年 2 月在奥地利维也纳举行，议题涵盖了核

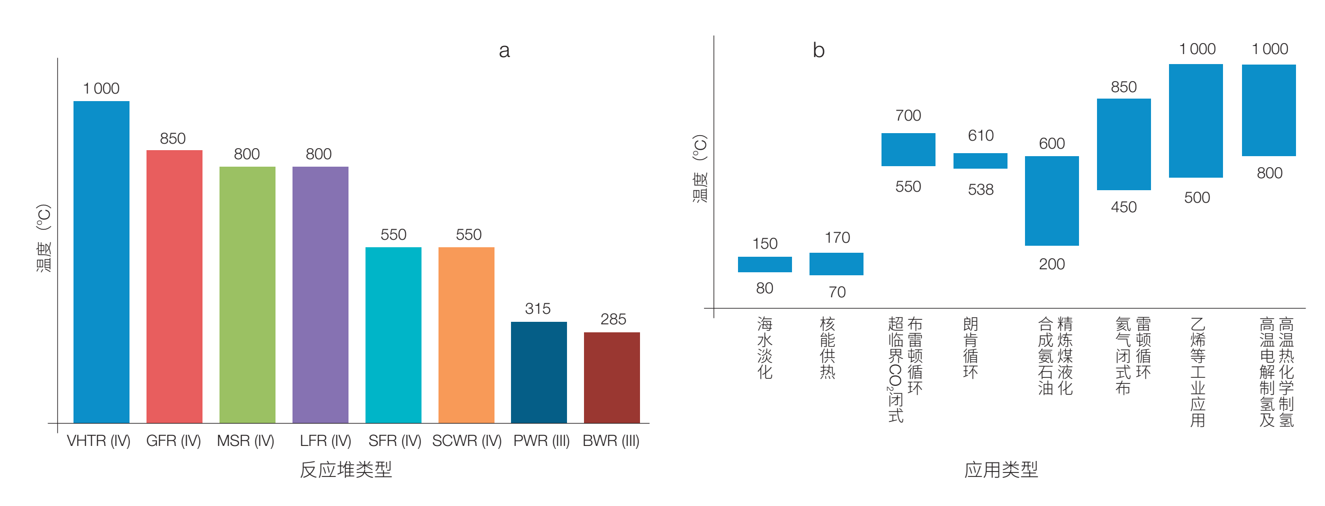


图 1 不同核反应堆及应用的温度范围

（a）不同反应堆（代）的出口温度，其中 VHTR—超高温反应堆、GFR—气冷快堆、MSR—熔盐堆、LFR—铅冷或铅-铋共熔物冷却的快堆、SFR—钠冷快堆、SCWR—超临界水堆、PWR—压水反应堆、BWR—沸水堆；（b）核能综合利用温度范围

能经济、安全、物理保护、防止扩散评估方法、通用先进反应堆技术信息交换等方面的合作，预计未来将扩展到其他领域，如先进反应堆的特殊安全要求，先进反应堆的未来市场条件/要求（如与可再生能源的整合）等。

2.2 钍基熔盐堆核能系统

钍基熔盐堆核能系统（TMSR）是第四代先进核能系统 6 个候选之一，包括钍基核燃料、熔盐堆、核能综合利用 3 个子系统。钍基核燃料储量丰富、防扩散性能好、产生核废料更少，是解决长期能源供应的一种技术方案。熔盐堆分为液态燃料熔盐堆（MSR-LF）和固态燃料熔盐堆（MSR-SF），后者也被称为氟盐冷却高温堆（FHR）。熔盐堆使用高温熔盐作为冷却剂，具有高温、低压、高化学稳定性、高热容等热物特性，并且无须使用沉重而昂贵的压力容器，适合建成紧凑、轻量化和低成本的小型模块化反应堆；熔盐堆采用无水冷却技术，只需少量的水即可运行，可用于干旱地区实现高效发电。熔盐堆输出的 700℃ 以上高温核热可用于高效发电，同时由于其使用高化学稳定性和热稳定的无机熔盐作为传蓄热介质，非常适合长距离的热能传输，从而大幅度降低对于核能综合利用的安全性顾虑，可以实现大规模的核能制氢，同时为合成氨等重要化工领域提供高品质的工艺热，进而有效缓解碳排放和环境污染问题[6]。

保证反应堆的安全可靠运行是核能发展中最重要的先行目标。作为第四代核能系统，熔盐堆具有很高的固有安全性，堆内工作环境为近常压，极大地降低了主容器、堆内构件及安全壳等的承压需求，一些在水堆内发生的事故将可以得到避免，如大破口及双端断裂事故、管道破口导致的冷却剂闪蒸喷发现象等。熔盐的沸点高至 1 400℃ 左右，而堆内运行温度在 700℃，安全阈值很高：当温度超过设定值时，反应堆底部的冷冻塞会因过高温自动熔化，掺混了核燃料的熔盐流入应急储存罐与中子反应区分离，核反应随即终止。熔盐可作为反应堆的一层安全屏障，溶解滞留大部分裂变产物，特别是气态裂变产物（如 Cs-137、I-131 等）；熔盐化学稳定性高，不与其他物质作用，防止了新的衍生事故发生，可在很大程度上降低事故后的环境影响。熔盐堆可以在线后处理，是能够高效利用钍的唯一堆型。熔盐堆可灵活地进行多种燃料循环方式，如一次利用、废物处理、燃料生产等，不需要特别处理而直接利用铀、钍和钚等所有核

燃料，也可利用其他反应堆的乏燃料。

3 核能利用研究现状

3.1 高效发电

针对堆内运行温度在 700℃以上的第四代先进核能系统，现阶段较为成熟的热功转换系统主要包括蒸汽轮机系统（基于朗肯循环）以及闭式循环燃气轮机系统（基于闭式布雷顿循环）。根据工质的不同，闭式循环燃气轮机亦可分氦气轮机、氮气轮机、超临界二氧化碳轮机及混合工质轮机等，不同热工转换系统效率对比如图 2 所示。从图中可以看出，温度越高，热功转换系统效率越高，相比较传统蒸汽循环，高温条件下的热循环发电系统，能够更充分地利用 700℃以上核能系统的高品质热量，实现高效发电。

蒸汽轮机系统技术发展已有百年以上，成熟度最高，但其系统较为庞大和复杂，在运行维护过程中需要不断补充循环水，因此在水资源匮乏的地区不宜采用。目前，火力发电常用的蒸汽轮机功率等级均在 300 MW 以上，多采用超临界及超超临界机组，温度范围 538℃—610℃，压力范围 24—32 Mpa，效率约 41%—44%[7]。700℃超临界是蒸汽轮机现阶段发展的瓶颈，因耐高温高压材料问题很难在短时间内突破且成本昂贵。

闭式循环燃气轮机系统特别适用于中高温热源，进而获得较高的热功转换效率，具有热源灵活、工质多样性的技术优势。相比蒸汽轮机，闭式循环燃气轮机功率密度大，因而尺寸小、投资少；并且由于可以少用水，在选址上具有很大灵活性。20 世纪中期，以空气为工质的闭式循环燃气轮机曾广泛应用于发电领域，技术成熟度较高。后随着高温核能概念的兴起，氦气轮机获得了极大的重视，并完成了非核领域的工业示范[8]。针对出口温度为 700℃以上的第四代先进核能系统，常用工质闭式布雷顿循环燃气轮机性能比较如下：气体工质（氦气、氮气、空气或混合工质）闭式循环燃气轮机热效率可接近 40%，超临界二氧化碳工质效率可接近 50%。但从技术成熟度来看，超临界二氧化碳轮机目前还处于中试阶段，缺乏工业示范验证，而且其高温材料问题也是技术难点[9]。

3.2 核能制氢

第四代核能反应堆制氢方面的研究，其核心都是基于高温堆的工艺热。从核反应堆的角度来看，熔盐堆、超高温气冷堆等出口温度都超过 700℃，所提供的工艺热都可以满足高温制氢过程，其系统效率和反应堆能提供的热能温度有很大的相关性（图 3）[10,11]。目前核能制氢主要有两种途径：热化学循环制氢和高温电解制氢。

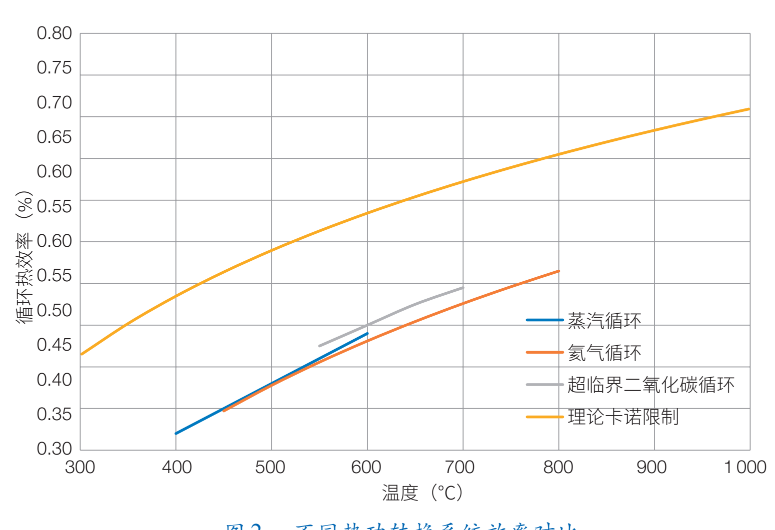


图 2　不同热功转换系统效率对比

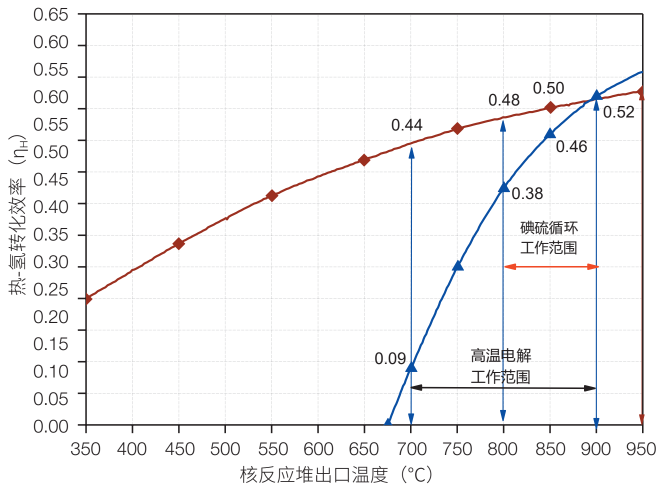


图 3　核能制氢系统效率对比

3.2.1 热化学循环制氢

热化学循环制氢是通过水蒸气热裂解的高温热化学循环过程来制备氢气。这一过程中主要利用反应堆提供的高温热，在上百条热化学循环路线中，主要有I-S循环、Cu-Cl循环、Ca-Br循环、U-C循环等可以与四代堆相匹配的技术路线。但是I-S循环制氢效率受温度影响较大，在900℃以上效率可超50%，但随着温度降到800℃以下，效率急剧下降。同时也需指出的是，热化学循环是一个典型的化工过程，其工艺的规模化放大还存在一定风险；同时，高温下的强腐蚀性对材料和设备也提出了较高的要求，生产厂房的占地面积也较大。因此，循环制氢技术主要挑战在于优化技术路线、提高整个过程的效率、解决反应器腐蚀等问题。

目前日本原子能机构完成I-S循环制氢中试，制氢速率达到150 L/h[10]；清华大学建立了实验室规模I-S循环实验系统（60 L/h），并已实现系统的长期运行[12]。

3.2.2 高温电解制氢

高温电解水蒸气制氢气（HTSE）以固体氧化物电解池（SOEC）为核心反应器，实现水蒸气高效分解制备氢气。由于高温电解制氢技术具有高效、清洁、过程简单等优点，近年来受到国内外研究者及企业的重视，已经成为与核能、风能、太阳能等清洁能源联用来制氢的重要技术。因高温电解制氢技术可与核能或可再生能源结合，用于清洁燃料的制备和二氧化碳的转化，在新能源领域具有很好的应用前景。此外，由于可再生能源（如风能、太阳能、水能等）有很大的波动性，并且受地域的限制，在传输上遇到很大困扰，而利用高温电解制氢技术为可再生能源的能源转化和储存提供了重要途径，是未来新型能源网络中不可或缺的重要组成[13,14]。

高温电解制氢技术主要包括电解质与电极材料、电解池、电解堆和系统4个层面。目前高温电解制氢技术面临的主要挑战包括电解池长期运行过程中的性能衰减问题、电解池的高温连接密封问题、辅助系统优化问题、大规模制氢系统集成问题。SOEC是HTSE技术中的核心反应器（图4）。电解池（堆）中的电极/电解质材料在运行中存在着诸多分层、极化、中毒等问题，是导致系统衰减的重要原因。因此，需要针对SOEC工艺的特性，重点攻关电解池材料在高温和高湿环境下的长期稳定性问题；同时提升SOEC单电池生产装备的集成化和自动化水平，提高单电池良品率和一致性。大力发展千瓦级SOEC制氢模块的低成本和轻量化设计，提高规模化集成技术水平，开发电解池堆的分级集成技术。解决了这些问题，就可以使其在经济上具备一定的竞争力，从而更快进入实际应用领域。

目前，美国、德国、丹麦、韩国、日本和中国等国家都在积极开展相关方面的研究工作[14-17]。德国Sunfire公司和美国波音公司合作，建成了国际规模最大的150 kW高温电解制氢示范装置，其制氢速率达到40 Nm^3/h。中国科学院上海应用物理研究所在2015年研制5 kW高温电解制氢系统基础上，以及

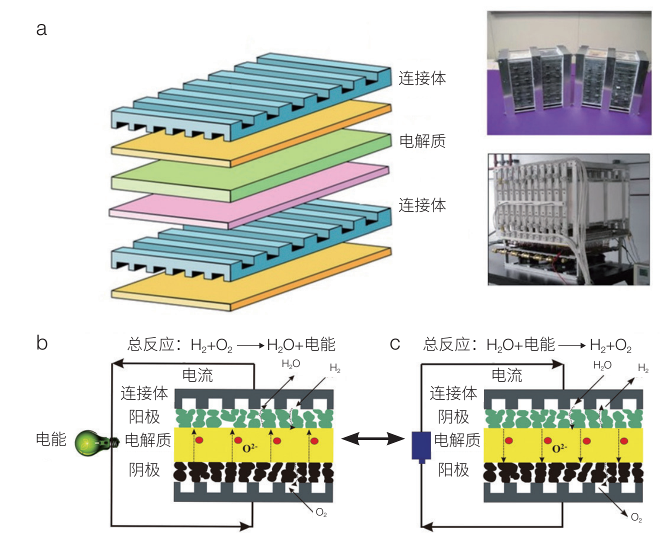


图4　固体氧化物燃料电池（SOFC）/固体氧化物电解池（SOEC）电堆结构和发电/制氢两种模式工作原理

（a）SOFC/SOEC结构示意图；（b）SOFC发电工作原理；（c）SOEC高温电解制氢工作原理

中国科学院战略性先导科技专项的支持下，于2018年开展了20 kW高温电解制氢中试装置的研制，并计划于2021年建成国际首个基于熔盐堆的核能制氢验证装置，设计制氢速率达到50 Nm^3/h。

3.3 海水淡化

淡水和能源资源对于人类社会生存和发展至关重要，是不可或缺的必须条件。海水淡化是获取淡水资源的一种重要途径，规模化的海水淡化需要大量的能量消耗。因此未来从环保和可持续发展等角度考虑，基于核能的海水淡化技术将占有越来越重要的位置。

海水淡化技术是利用蒸发、膜分离等手段，将海水中的盐分分离出来，获得含盐量低的淡水技术。其中反渗透法（RO）、多效蒸馏法（MED）、热压缩多效蒸馏法（MED—VC）和多级闪蒸法（MSF）是经过多年实践后认为适用于大规模海水淡化的成熟技术。上述几种海水淡化技术都是利用热能或者电能来驱动，因此在技术上都可以实现并适用于与核反应堆耦合。在核反应堆和海水淡化工厂的耦合过程中，需要重点考虑以下3个问题：① 如何避免淡化后的水被放射性元素影响；② 如何避免海水淡化系统给核反应堆带来额外的影响；③ 如何将两者的规模更合理的匹配起来。

过去十几年来，许多国家对核能海水淡化的技术给予越来越多的关注，IAEA也在推进核能海水淡化的过程中起到了重要的组织和协调作用。包括中国在内的许多成员国参加了由IAEA组织的国际合作研究计划，提出了各自不同的高安全性核反应堆方案以应用于海水淡化系统[18,19]。

目前，我国已建和在建的海水淡化系统累计海水淡化能力约为600 000吨/天，成本大约为4—5元/吨[20]。海水淡化技术正在逐渐走向成熟，随着成本的不断降低，其经济性也在不断提升。国内核电站大多建于沿海地区，为推动基于核能海水淡化建设提供了更多便利。其中，红沿河核电站、宁德核电站、三门核电站、海阳核电站、徐大堡核电站、田湾核电站，以及未来的山东荣成示范核电站均采用海水淡化技术为厂区提供可用淡水。在海水淡化的主流技术中，反渗透法具有显著的节能性，在我国被广泛推广和使用。

3.4 核能供热

我国60%以上的地区、50%以上的人口需要冬季供热。目前的供热方式主要为集中供热和分布式供热；其中，集中供热主要来自于燃煤热电联产或者燃煤锅炉，每年需要消耗5亿吨煤炭。为了缓解用煤导致的严重环境污染和雾霾天气，我国部分地区率先开始“煤改气”“煤改电”的工程，但这也导致了天然气资源稀缺、电网负担加重等困难。

核能作为清洁能源，在未来会成为重要的供热资源。核能供热的一大优势就是低碳、清洁、规模化。以一座400 MW的供热堆为例，每年可替代32万吨燃煤或1.6亿立方米燃气，与燃煤供热相比，可减少排放二氧化碳64万吨、二氧化硫5 000吨、氮氧化物1 600吨、烟尘颗粒物5 000吨。

目前核能供热主要有两种方式：低温核供热和核热电联产。20世纪80年代，瑞典的核动力反应堆Agesta已经实现了连续供热，是世界上第一个民用核能供热核电站的示范。此后，俄罗斯、保加利亚、瑞士等国也开始研发、建造核能供热系统。我国于20世纪80年代也开始了核能供热反应堆的研发；1983年，清华大学在池式研究堆上实现我国首次核能低温供热实验[21]。经过多年的研究和发展，在低温核供热技术层面已经逐渐形成了池式供热堆和壳式供热堆两种主流类型。池式供热堆以游泳池实验堆为原型，壳式供热堆由目前主流压水堆核电站技术演进而来。核热电联产的最大优势是节能，实现了能源资源的优化配置，热电联产的综合能源利用率可以达到80%，具有较高的综合能源利用率；其缺点是热电不能同时兼顾，因此需要同核供热协同形成优势互补。

近年，核能供热产业在国内获得极大的关注。

2017 年，由国家发改委、国家能源局、环保部等十部门共同制定的《北方地区冬季清洁取暖规划（2017—2021 年）》就明确提出，研究探索核能供热，推动现役核电机组向周边供热，安全发展供暖示范。中核集团推出了“燕龙”泳池式低温供热堆，中广核集团和清华大学推出了壳式低温供热堆，国家电投提出了微压供热堆，上述核能供热试点目前已经在黑龙江、吉林、辽宁、河北、山东、宁夏、青海等多个省区开展了相关厂址普选和产业推广工作。

核能供热战略布局可以有效解决我国北方多地的缺热情况。另外，引入大温差长途输热技术后，我国核能供热将不再受困于远距离输热的限制，核反应堆因此可以安置在核安全距离以外，并为城市提供安全、稳定的热能。

3.5 核能高温工艺热利用

合成氨、煤气化和甲烷蒸气重整等化工过程都需要 700℃以上的高温热，这些传统化工行业的能耗巨大，而对于合成氨、煤液化以及石油裂解产物（如乙烯）的需求正在逐渐增长。面对越来越严苛的碳排放要求以及传统能源资源的日益匮乏，探索新的工业能源供给和耦合十分重要。如果能够直接利用反应堆产生的高温热，可以实现节能 30% 左右，在降低能源消耗总量的同时，提高了核能的经济性。以熔盐堆为代表的第四代核反应堆，其出口温度可以达到 700℃以上。未来可使用反应堆产生的热可直接作为工业生产过程的热源，用于天然气的蒸汽重整、煤的气化和液化、合成氨、乙烯生产等高耗能领域，而节约下来的化石燃料可以用作化工原料[22]。

高温工艺热利用面临的一个重要挑战是安全防护及管理和许可问题，需要消除管理者和公众对于核能和化工耦合利用的担忧；同时，对于不同类型的工艺热利用，需要执行新的管理规定，申请新的许可。

4 展望

面对未来的能源低碳化需求，核能和可再生能源是实现零碳排放的重要途径。可再生能源具有资源丰富、清洁、可再生等优点，但是可再生能源的波动性或间歇性导致其与目前的电网基础设施缺乏良好的兼容性，大规模使用时，需要提供稳定的基荷能源调控电力输出。核能由于其可持续、高效、可靠，是唯一能够提供可调度基荷电力的清洁能源。因而构建核能-可再生能源融合的复合能源系统（HES）是实现能源低碳清洁高效利用的重要解决方案。

对于第四代核能系统，可以通过熔盐传蓄热和高温制氢技术，将核能和可再生能源的优势充分发挥，协同利用。因此，需要从经济和能源安全的角度来评估各种清洁能源在全国乃至全球能源体系中的份额，制定合理的技术路线，开展多能融合的核能-可再生能源复合能源系统示范（图 5），并实现稳定运行。解决并克服这两种技术耦合使用时的问题，对于经济和

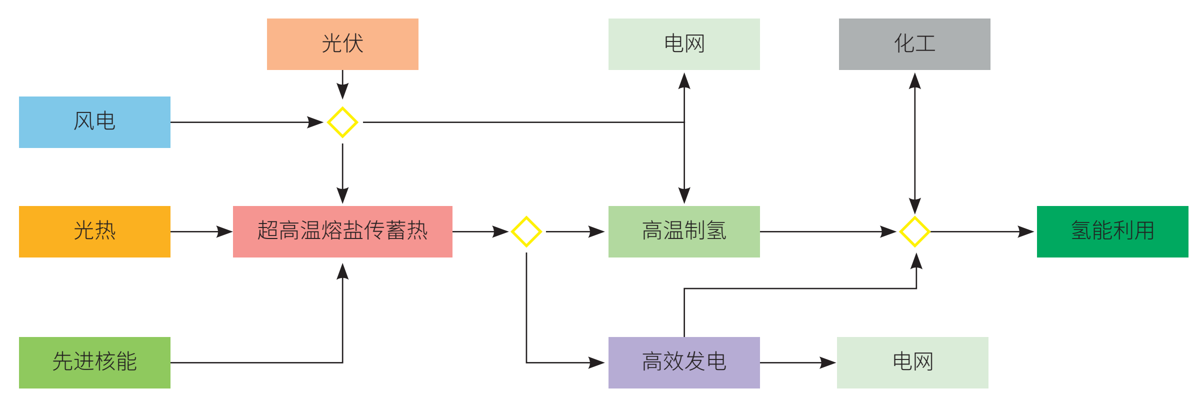


图 5　核能 - 可再生能源复合能源系统

社会的发展进步具有重要意义，也是目前核能综合利用发展的重要趋势。

当前，以华龙一号、AP1000、EPR等为代表的第三代核能系统已经开始大规模商业应用，可满足当前和今后一段时期核电发展的基本需要。建议加快以熔盐堆为代表的第四代核能系统及相关的核能制氢、高温热利用等综合利用技术研发，充分调动国内相关研究机构和企业的优势力量，加大政策支持和投入保障力度，将相关任务列入国家科技重大专项，落实并建设核能制氢、核能供热等综合利用示范项目的建设。

参考文献

1 IEA. Electricity Statistics. [2019-04-03]. https://www.iea.org/statistics/electricity/.

2 IAEA. The database on nuclear power reactors. [2019-04-02]. https://pris.iaea.org/pris/.

3 中国核能行业协会. 2018年1—12月全国核电运行情况. [2019-01-28]. http://www.china-nea.cn/site/content/35592.html.

4 IAEA. Non-electric applications of nuclear power: Seawater desalination, hydrogen production and other industrial applications. Oarai: IAEA, 2007.

5 Generation IV International Forum. Generation IV Systems. [2013-09-23]. https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_59461/generation-iv-systems.

6 江绵恒, 徐洪杰, 戴志敏. 未来先进核裂变能——TMSR核能系统. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 366-374.

7 陈硕翼, 朱卫东, 张丽, 等. 先进超超临界发电技术发展现状与趋势. 科技中国, 2018, (9): 14-17.

8 Weisbrodt I A. Summary report on technical experiences from high-temperature helium turbomachinery testing in Germany. Beijing: IAEA, 1996.

9 高峰, 孙嵘, 刘水根. 二氧化碳发电前沿技术发展简述. 海军工程大学学报（综合版）, 2015, 12(4): 92-96.

10 International Atomic Energy Agency. Hydrogen Production Using Nuclear Energy. Vienna: IAEA, 2013.

11 Yan X L, Hino R. Nuclear Hydrogen Production Handbook. Boca Raton: CRC Press, 2018.

12 清华大学核能与新能源技术研究院. 高温气冷堆制氢关键技术研究达到预期技术目标. [2014-10-15] http://www.tsinghua.edu.cn/publish/inet/4019/2014/20141015153148648930933/20141015153148648930933_.html.

13 Fang Z, Smith R L, Qi X H. Production of Hydrogen from Renewable Resources. Berlin: Springer Netherlands, 2015.

14 Naterer G F, Dincer I, Zamfirescu C. Hydrogen Production from Nuclear Energy. London: Springer-Verlag, 2013.

15 Maskalick N J. High temperature electrolysis cell performance characterization. International Journal of Hydrogen Energy, 1986, 11(9): 563-570.

16 Herring J S, O'Brien J E, Stoots C M, et al. Progress in high-temperature electrolysis for hydrogen production using planar SOFC technology. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(4): 440-450.

17 Stoots C, O'Brien J, Hartvigsen J. Results of recent high temperature coelectrolysis studies at the Idaho National Laboratory. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(9): 4208-4215.

18 IAEA. Economics of nuclear desalination: New developments and site specific studies, [2007-07-01]. https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1561_web.pdf.

19 IAEA. New Technologies for Seawater Desalination Using Nuclear Energy. Vienna: IAEA, 2015.

20 陈微, 张立君. 海水淡化技术在国内外核电站的应用. 水处理技术, 2018, 44(11): 133-137.

21 田嘉夫, 杨富. 城市采暖用低温核供热站的参数规模及经济性. 区域供热, 1991, (2): 36-39.

22 IAEA. Advances in Nuclear Power Process Heat Applications. Vienna: IAEA, 2012.

Research Status and Prospect of Comprehensive Utilization of Nuclear Energy

WANG Jianqiang* DAI Zhimin XU Hongjie

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Nuclear energy is essential for energy supply and national security. Compared with hydropower, optoelectronics, and wind power, as the clean energy replacing fossil fuels in the future, nuclear power takes great advantage in technology maturity, economical efficiency, as well as sustainability and natural environment flexibility. Come so far, except for a few reactors used for district heating and seawater desalination, nuclear energy is mainly used for power generation. With the development of technology, especially the gradually matured and applied fourth-generation nuclear energy system, nuclear energy is expected for a comprehensive utilization in different areas. This paper elaborates the current status and future development trend of nuclear energy utilization from the high-efficient power generation, high-temperature steam electrolysis, water desalination, district heating, and high-temperature industry process. Finally, it is expected that in the near future nuclear energy will occupy an important position in the hybrid-energy system.

Keywords nuclear energy, fourth-generation reactor, nuclear comprehensive utilization, nuclear hydrogen production, nuclear district heating



王建强 中国科学院上海应用物理研究所研究员，熔盐化学与工程技术部主任。1998年于黑龙江大学获学士学位；2006年于复旦大学获博士学位，同年获得德国洪堡奖学金；2006—2009年在德国慕尼黑工业大学从事无机簇合物合成及结构研究。2010年起于中国科学院上海应用物理研究所工作。目前主要从事钍基熔盐堆核能系统中熔盐化学与技术、核能高温制氢技术等研究。E-mail: wangjianqiang@sinap.ac.cn

WANG Jianqiang Professor and Director of Molten Salt Chemistry and Engineering Division, Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences. He graduated in 1998 from Heilongjiang University, and got Ph.D. degree in 2006 from Fudan University. From 2006 to 2009, he performed the research on synthesis and characterization of inorganic cluster in Technische Universität München as Humboldt Research Fellow. His research expertise and scholarly activities lie in molten salt chemistry of thorium molten salt nuclear reactor and hydrogen production by high temperature steam electrolysis with SOEC. E-mail: wangjianqiang@sinap.ac.cn

■责任编辑：张帆

*Corresponding author

参考文献（双语版）

1 IEA. Electricity Statistics. [2019-04-03]. https://www.iea.org/statistics/electricity/.

2 IAEA. The database on nuclear power reactors. [2019-04-02]. https://pris.iaea.org/pris/.

3 中国核能行业协会. 2018年1—12月全国核电运行情况. [2019-01-28]. http://www.china-nea.cn/site/content/35592.html.

China Nuclear Energy Industry Association. National nuclear power operation from January to December of 2018. [2019-01-28]. http://www.china-nea.cn/site/content/35592.html. (in Chinese)

4 IAEA. Non-electric applications of nuclear power: Seawater desalination, hydrogen production and other industrial applications. Oarai: IAEA, 2007.

5 Generation IV International Forum. Generation IV Systems. [2013-09-23]. https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_59461/generation-iv-systems.

6 江绵恒, 徐洪杰, 戴志敏. 未来先进核裂变能——TMSR核能系统. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 366-374.

Jiang M H, Xu H J, Dai Z M. Advanced fission energy program—TMSR nuclear energy system. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(3): 366-374. (in Chinese)

7 陈硕翼, 朱卫东, 张丽, 等. 先进超超临界发电技术发展现状与趋势. 科技中国, 2018, (9): 14-17.

Chen S Y, Zhu W D, Zhang L, et al. Development status and trend of advanced ultra-supercritical power generation technology. Scitech in China, 2018, (9): 14-17. (in Chinese)

8 Weisbrodt I A. Summary report on technical experiences from high-temperature helium turbomachinery testing in Germany. Beijing: IAEA, 1996.

9 高峰, 孙嵘, 刘水根. 二氧化碳发电前沿技术发展简述. 海军工程大学学报（综合版）, 2015, 12(4): 92-96.

Gao F, Sun R, Liu S G. Introduction of supercritical CO_2 power generation technology. Journal of Naval University of Engineering (Comprehensive Edition), 2015, 12(4): 92-96. (in Chinese)

10 International Atomic Energy Agency. Hydrogen Production Using Nuclear Energy. Vienna: IAEA, 2013.

11 Yan X L, Hino R. Nuclear Hydrogen Production Handbook. Boca Raton: CRC Press, 2018.

12 清华大学核能与新能源技术研究院. 高温气冷堆制氢关键技术研究达到预期技术目标. [2014-10-15]. https://www.inet.tsinghua.edu.cn/info/1287/1362.htm.

Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University. Research on key technologies of hydrogen production in high temperature gas-cooled reactor has achieved the expected technical goals. [2014-10-15]. https://www.inet.tsinghua.edu.cn/info/1287/1362.htm. (in Chinese)

13 Fang Z, Smith R L, Qi X H. Production of Hydrogen from Renewable Resources. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015.

14 Naterer G F, Dincer I, Zamfirescu C. Hydrogen Production from Nuclear Energy. London: Springer London, 2013.

15 Maskalick N J. High temperature electrolysis cell performance characterization. International Journal of Hydrogen Energy, 1986, 11(9): 563-570.

16 Herring J S, O'Brien J E, Stoots C M, et al. Progress in high-temperature electrolysis for hydrogen production using planar SOFC technology. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(4): 440-450.

17 Stoots C, O'Brien J, Hartvigsen J. Results of recent high temperature coelectrolysis studies at the Idaho National Laboratory. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(9): 4208-4215.

18 IAEA. Economics of nuclear desalination: New developments and site specific studies. [2007-07-01]. https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1561_web.pdf.

19 IAEA. New Technologies for Seawater Desalination Using Nuclear Energy. Vienna: IAEA, 2015.

20 陈微, 张立君. 海水淡化技术在国内外核电站的应用. 水处理技术, 2018, 44(11): 128-132.

Chen W, Zhang L J. Application of seawater desalination technology in nuclear power plant. Technology of Water Treatment, 2018, 44(11): 128-132. (in Chinese)

21 田嘉夫, 杨富. 城市采暖用低温核供热站的参数规模及经济性. 区域供热, 1991, (2): 36-40.

Tian J F, Yang F. Parameter scale and economy of low temperature nuclear heating station for urban heating. District Heating, 1991, (2): 36-40. (in Chinese)

22 IAEA. Advances in Nuclear Power Process Heat Applications. Vienna: IAEA, 2012.